

# فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، هفتم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، (سالی ۲۵): صص ۱۰-۱

## عملکرد پل‌های بتنی پیش‌تنیده تحت بار انفجاری

احسان مهدوی صفت<sup>۱</sup>، مهدی وطنی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۸

### چکیده

افزایش رفتارهای تروریستی بر سازه‌های زیربنایی و حمل‌ونقل، یک هشدار برای امنیت ملی است. طراحی سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری در گذشته فقط محدود به ساختمان‌های نظامی و ساختمان‌های مرتبط با فعالیت‌های هسته‌ای و سوختی می‌شد. پل‌ها اجزای مهمی در سیستم‌های حمل‌ونقل هستند. نقش حیاتی پل‌ها، اهمیت ملی آنها و خسارت ناشی از آسیب وارده به پل‌ها، آنها را به اهداف تروریستی جذابی تبدیل کرده و طراحی بهتر این سازه‌ها تحت بار انفجاری، برای جلوگیری از فروپاشی پیش‌رونده سازه و تلفات انسانی فاجعه‌انگیز است. پل‌های پیش‌تنیده بتنی خیلی رایج هستند، با این وجود، اطلاعات خیلی کمی در مورد رفتار پل‌های بتنی پیش‌تنیده در برابر بار انفجار موجود است و مطالعه در مورد این نوع پل‌ها تحت بارهای انفجاری محدود است. در این تحقیق یک مدل اجزاء محدود برای پل‌های بتنی با اجزای پیش‌تنیده بتنی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. دقت شبیه‌سازی عددی با داده‌های تست‌های آزمایشگاهی توسط محققین دیگر مقایسه شده و تطابق قابل قبولی به دست آمده است. مدل‌های ایجاد شده تحت سناریوهای مختلف انفجاری با وزن مواد منفجره مختلف، در عرض عرشه پل قرار گرفته‌اند. فرآیند تخریب اجزای پل مشاهده شده و بر روی سازه و کار آسیب وارده بحث شده است. نتایج به دست آمده در این مطالعه، اطلاعاتی در مورد پل‌های پیش‌ساخته پیش‌تنیده بتنی در مورد رفتار و پاسخ‌های احتمالی - وقتی که تحت بار انفجاری شدید می‌باشد - به دست می‌دهد و می‌تواند به مهندسان برای انتخاب موثرترین روش بهسازی برای مقاوم‌سازی و عملکرد بهتر این نوع پل‌ها در آینده کمک کند.

کلیدواژه‌ها: پل‌های بتنی پیش‌تنیده، بارگذاری انفجار، خرابی پیش‌رونده، روش‌های عددی

۱- دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران - Mahdavi\_ehsan@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد سازه امن، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل

## ۱- مقدمه

در مقایسه با بتن پیش‌تنیده، بتن تقویت‌شده توجه محققین بیشتری را در طول سال‌ها به خود جلب کرده است. مگنوسان و هالگرن [۵] ۴۹ تیر بتنی تقویت‌شده با مقاومت بالا را تحت انفجار قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تیرهای بتنی تحت بار انفجار نسبت به بار استاتیکی، افزایش مقاومت از خود نشان می‌دهند. همچنین مد شکست برای بعضی تیرها بین بارگذاری دینامیکی و استاتیکی عوض می‌شود.

برای مدل‌سازی رفتار سازه‌ها و پل‌های بتنی شامل عرشه و ستون در برابر بار انفجار، یک مدل آسیب برای مصالح توسعه داده شد. در این تحقیقات نشان داده شد که این مصالح برای پیش‌بینی پاسخ سازه‌ای برای بارهای انفجاری، نتایج قابل اعتمادی را می‌دهند [۶ و ۹].

بالوت و همکاران [۱۰]، تحقیقاتی را برای یک روش موثر تجزیه و تحلیل شاه‌تیرهای پل با اندازه‌های مختلف وزن و موقعیت مواد منفجره انجام دادند. در این تحقیقات، آنها اثر مقدار و توزیع بار را ارزیابی کردند.

همانطور که در بالا مشاهده گردید، اکثر تحقیق‌های قبلی، پاسخ اجزای پل‌ها تحت بار انفجار را به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، شبیه‌سازی‌های عددی برای پاسخ دینامیکی و نوع گسیختگی کلی پل‌های بتنی پیش‌تنیده بزرگ‌راهی نسبت به بارهای انفجاری آنالیز شده است. در نهایت، با توجه به خسارت‌های وارد شده به اجزای پل، برای مقاوم‌سازی و عملکرد بهتر پل در مقابل بارهای انفجاری نوع پل‌ها، پیشنهاداتی ارائه گردیده است.

## ۲- بارگذاری انفجار

انفجار در مقیاس بزرگ، به صورت آزاد شدن سریع و ناگهانی انرژی می‌باشد. شکل (۱) نمودار عمومی تاریخچه زمانی فشار-زمان انفجار را نشان می‌دهد. در زمان رسیدن موج انفجار به هدف  $t_A$ ، مطابق با شکل، فشار در آن موقعیت ناگهان به یک مقدار حداکثر  $P_{so}$ ، بیشتر از فشار محیط،  $P_0$  می‌رسد. فشار سپس به فشار محیط (فشار اولیه) در زمان  $t_d$  کاهش می‌یابد. این فاصله، فاز مثبت پالس فشار نامیده می‌شود. بعد از این مرحله، فاز منفی اتفاق می‌افتد. در این مرحله، زیر فشار محیط، یعنی یک فشار منفی است که در نهایت به شرایط محیط در زمان  $t_d + t_d^-$  می‌رسد.

روش‌های مرسوم مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار، معمولاً برای سازه‌های دولتی و نظامی انجام می‌شود. اما اخیراً مهندسان برای مقابله با اهداف ضد تروریستی، به طراحی گستره بیشتری از سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری علاقه‌مند شده‌اند. در این میان، پل‌ها به خاطر شرایط ویژه، جزء سازه‌های زیربنایی حمل‌ونقل مهم محسوب می‌شوند و آسیب به آنها می‌تواند اثر قابل ملاحظه‌ای بر اقتصاد بگذارد. مقاوم‌سازی پل‌ها در برابر وقوع انفجار، نیازمند تمهیدات ویژه‌ای است. بنابراین، فهمیدن رفتار پل‌ها در برابر بار انفجار خیلی مهم است؛ به ویژه آنکه اطلاعات کمی در مورد رفتار پل‌های بتنی پیش‌تنیده تحت بارهای انفجار در دسترس است.

مطالعه پاسخ سازه‌ای پل‌ها تحت بارهای انفجاری، توسط شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی بررسی می‌شود. اما ساختن تست آزمایشگاهی در مقیاس واقعی خیلی مشکل و پرهزینه است. علاوه بر این، ارزیابی پارامترهای مهم و مشاهده فرآیند گسیختگی در انفجارهای نزدیک، به دلیل از بین رفتن تجهیزات اندازه‌گیری خیلی مشکل و تقریباً غیر ممکن است. بنابراین، شبیه‌سازی‌های عددی، یک روش بسیار مناسب و کارآمد برای ارزیابی رفتار پل‌ها تحت بار انفجاری می‌باشد. در این راستا، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی به شرح زیر انجام شده است.

رابزوک و ایبل [۱] با استفاده از یک روش بدون المان‌بندی، گسیختگی دینامیکی بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این روش، یک مدل که می‌تواند رفتار بتن تحت شرایط بارگذاری دینامیکی شدید و تغییر شکل‌های زیاد را نشان دهد، پیشنهاد گردید. مقایسه بین تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی انطباق خوبی را نشان داد.

ژو و لی [۲] رفتار عمومی صفحه‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار با استفاده از روش عددی و به خصوص تمرکز بر آسیب انهدام را مطالعه و معیارهایی تجربی برای انهدام بتن که پاسخ سه‌بعدی بتن را لحاظ می‌کند، پیشنهاد کردند.

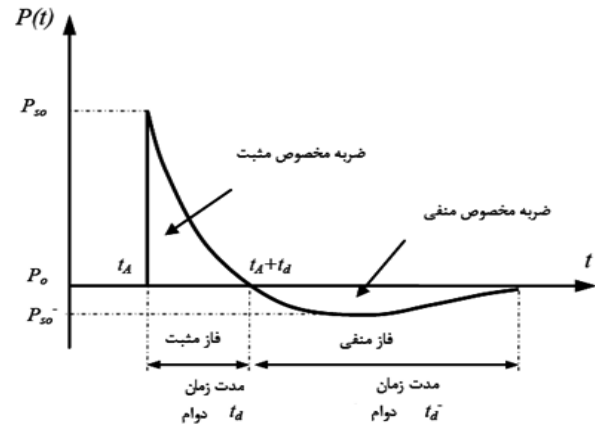
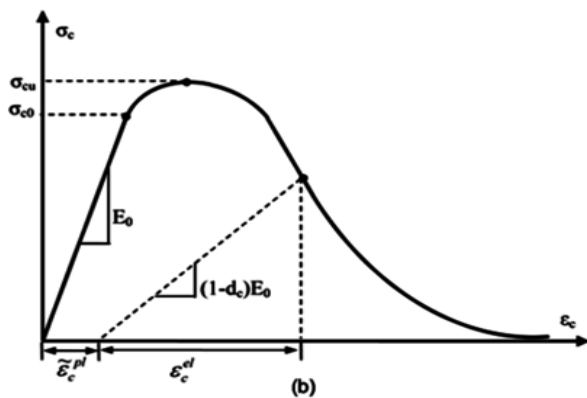
ویلیامسون و وینگت [۳] و وینگت و همکاران [۴] برای تعیین عملکرد و پاسخ پل‌ها تحت بار انفجار، از تحلیل دینامیکی درجه آزادی مجزا (SDOF) استفاده کردند. در این تحقیقات، بتن پیش‌تنیده در پل‌های چند دهانه مورد آنالیز قرار گرفت و نتایج نشان داد که هندسه پل، فاصله انفجار از هدف، و محل انفجار اثر مهمی بر روی پاسخ پل دارد.

باشند، ضربه وارده می‌تواند از طریق بازشدگی‌های در و پنجره نفوذ کند و به کف‌ها، سقف‌ها، دیوارها، محتویات و افراد، فشار ناگهانی و تکه‌های آوار از شکستن پنجره‌ها درها و غیره وارد کند. اجزای ساختمان قابلیت مقاومت در برابر امواج انفجار را ندارند، در نتیجه شکسته شده و باعث ایجاد تکه‌های آوار بیشتر و جابجایی توسط فشار دینامیکی که بلافاصله به‌دنبال موج اولیه می‌آید، می‌شوند. محتویات ساختمان‌ها و افراد ممکن است جابجا شده و در جهات انتشار موج انفجار پرت شوند. در این حالت، انفجار در سرتاسر ساختمان انتشار می‌یابد.

برای هر نرخ کرنشی، یک مدل پلاستیسیته آسیب بتن بر پایه مکانیک آسیب، برای آنالیز آسیب موضعی اجزایی که تحت بار انفجار هستند استفاده شده است [۱۳-۱۱]. رفتار کششی و فشاری تک‌محوری بتن استفاده‌شده در مدل به‌صورت شماتیک در شکل (۲) آمده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که نمونه بتنی در هر نقطه از شاخه نرم شدگی کرنش بارگذاری می‌شود، سختی الاستیک مصالح کاهش می‌یابد. کاهش سختی الاستیک بوسیله پارامترهای آسیب  $dc$  و  $dt$  مشخص می‌شود. این پارامترها به ترتیب سطح آسیب در فشار و کشش را توصیف می‌کنند. پارامترهای آسیب می‌توانند مقداری بین صفر (بیان‌کننده مصالح آسیبنده) تا ۱ (بیان‌کننده از دست رفتن کل مقاومت مصالح) باشند. مدول الاستیسیته  $E_0$  بیان‌کننده سختی الاستیک اولیه (آسیبنده) مصالح، و رابطه تنش-کرنش برای بارگذاری فشاری و کششی تک‌محوره می‌باشد که در رابطه‌های (۱) و (۲) بیان شده است:

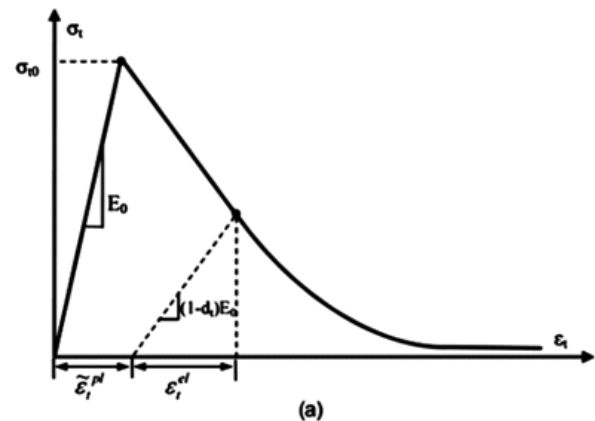
$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl}) \quad (2)$$

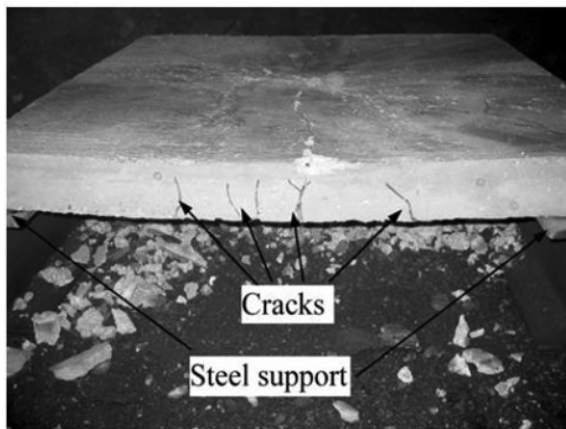


شکل ۱- نمودار تاریخچه زمانی-فشار موج انفجار

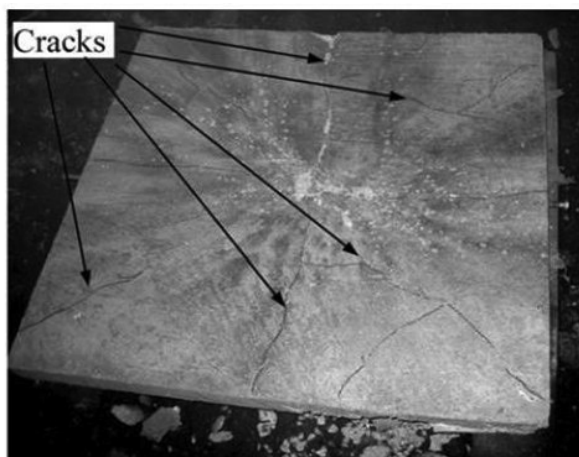
از نمودار زمان-فشار، دو مرحله اصلی می‌تواند مشاهده شود: قسمت بالای محصورشده، مرحله مثبت در زمان نامیده می‌شود، در حالی که قسمت پایین محصورشدگی، مرحله منفی در زمان نامیده می‌شود. مرحله منفی طولانی‌تر است و از شدت کمتری نسبت به مرحله مثبت برخوردار است. با افزایش فاصله مکش، زمان فاز مثبت موج انفجار در یک دامنه کمتری افزایش می‌یابد و پالس ضربه، زمان طولانی‌تری است. مواد منفجره اگر خیلی به سازه هدف نزدیک باشد، یک ضربه بزرگ وارد می‌کند؛ بار فشار با شدت بالا در یک ناحیه موضعی از سازه وارد می‌شود. مواد منفجره قرار داده‌شده دورتر فشار با گستردگی یکنواخت، شدت کمتر و در زمان طولانی‌تری در سراسر کل سازه انتشار می‌یابد. سرانجام، کل سازه در اثر موج انفجار و با اثرات انعکاس و انکسار متمرکز و ایجاد ناحیه سیاه‌شده در الگوی پیچیده‌ای در پیرامون سازه تخریب می‌شود. در طی مرحله منفی، سازه ضعیف‌شده ممکن است توسط تکه‌های آوار خراب شده، تحت ضربه قرار گرفته و باعث خرابی بیشتر شود. اگر دیوارهای خارجی ساختمان قابلیت مقابله با بار انفجار را داشته



شکل ۲- رفتار بتن در بارگذاری تک‌محوره (a) کشش (b) فشار

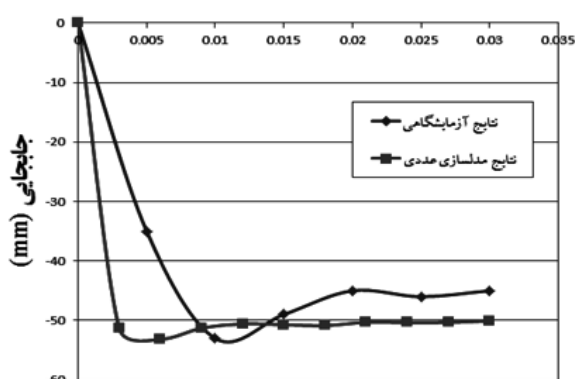


(a) Side view



(b) Top view

شکل ۳- نتایج آزمایش انجام شده بر روی دال بتنی تقویت شده



(s) زمان

شکل ۴- نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز دال تحت بار انفجار اعمال شده

(مصالح با رنگ خاکستری) شامل ترک‌های سنگین است. برخی از ترک‌ها به صورت شعاعی و برخی به صورت دایره‌ای هستند. این

### ۳- صحت‌سنجی مدل اجزای محدود

برای ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی ایجاد شده در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی رفتار و پیش‌بینی آسیب سازه‌های بتنی تحت بار انفجار، لازم است در ابتدا صحت‌سنجی مدل انجام شود. برای این کار، یک دال بتنی تقویت شده که توسط محققین دیگر مورد آزمایش قرار گرفته است، مطابق با شرایط آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده است. این تست‌های آزمایشگاهی در دانشگاه Missouri-Rolla انجام شده است [۱].

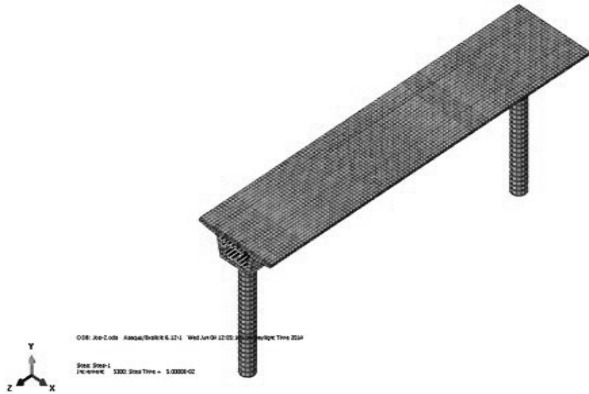
برای صحت‌سنجی مدل عددی یک دال بتنی تقویت شده به ابعاد  $۱۰/۸ \times ۱/۲۲ \times ۱/۲۲$  متر، که میلگردهای فولادی آجدار با سطح مقطع ۷۱ میلی‌متر مربع به فاصله ۱۵۲ میلی‌متر مرکز به مرکز به‌طور یکنواخت در دو جهت در پایین دال و پوشش خالص ۱۳ میلی‌متر از سطح بتن قرار گرفته‌اند. دال بر روی دو تیر موازی شکل I با داشتن  $۰/۱۵۲$  متر عرض بال بدون گیرداری قرار دارد. مواد منفجره TNT به وزن  $۱/۱۶$  کیلوگرم در فاصله  $۰/۳$  متری در بالای وسط دال آویزان شده است.

به دلیل تقارن، تنها یک چهارم دال مدل شده است. چون بار انفجار نزدیک سطح بالای دال آویزان شده است، جلوی امواج کروی ضربه در نظر گرفته می‌شود. از پارامترهای بیان شده برای تست آزمایشگاهی در قسمت قبل، به عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS/Explicit استفاده شده است.

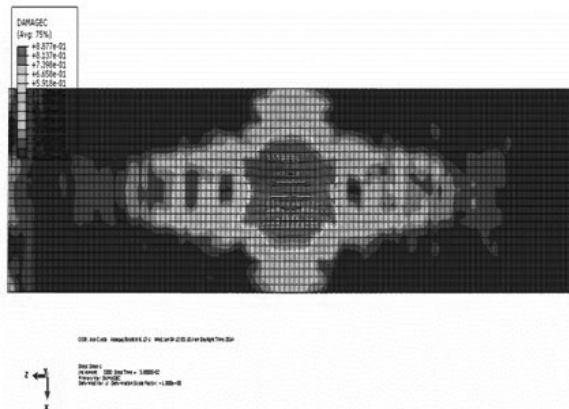
نتایج آزمایش انجام شده به صورت عکس‌های بعد از آزمایش انفجار در شکل (۳) آمده است. از الگوی آسیب و سطح آسیب مشاهده شده در این عکس‌ها ترک‌های اصلی نمایان است. ترک اصلی اشاره دارد به ترک‌های آشکار با عرض میلی‌متری و آسیب شدید نشان‌دهنده خردشدگی کامل بتن و تغییر شکل دائمی زیاد میلگردهای تقویتی است [۱۵].

شکل (۴) نشان‌دهنده تاریخچه زمانی جابجایی مرکز دال برای نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق تحت بار انفجار اعمال شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انطباق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و آنالیز اجزاء محدود وجود دارد. اندازه حداکثر انحناء (تغییر شکل) ۵۳ میلی‌متر در ۵ میلی‌ثانیه است و سپس به مقدار ۵۰ میلی‌متر بهبود می‌یابد که نهایتاً بیانگر تغییر شکل‌های پسماند است. شکل (۵) مدل را در انتهای بارگذاری انفجار اعمال شده نشان می‌دهد. برای مشخص کردن نواحی ترک‌های مهم، پارامتر حداکثر کرنش پلاستیک اصلی بررسی شده است. کرنش‌ها که از  $۰/۰۰۴$  بیشتر هستند

زمان آنالیز، زمانی است که طول می کشد تا موج انفجار در عرض پل حرکت کند. شکل (۷) نشان دهنده مدل در پایان اعمال موج فشار (۵ میلی ثانیه) است.



شکل ۶- نمای کلی مدل پل پیش تنیده پیش ساخته ایجاد شده در ABAQUS



شکل ۷- سطح عرشه پل بعد از اعمال انفجار

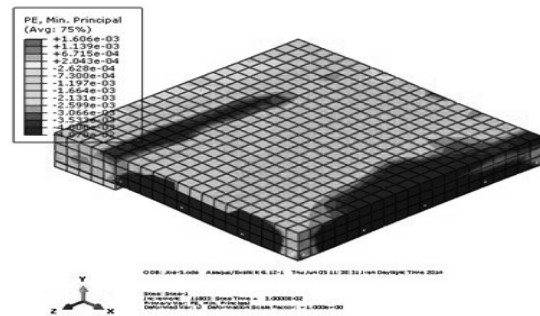
#### ۴-۱- سناریوهای انفجار در بالای عرشه

شش سناریوی مختلف انفجار روی عرشه توسط آنالیز اجزاء محدود بررسی شده است. سه سناریو با وزن مواد منفجره ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در وسط دهانه عرشه و یک متر بالای عرشه، روی خط وسط عرشه (بین دو جان عمودی عرشه) اعمال می شود. سه سناریوی دیگر با وزن مواد منفجره ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم در وسط دهانه عرشه و یک متر بالای عرشه، مستقیماً روی جان عمودی عرشه اعمال می شود.

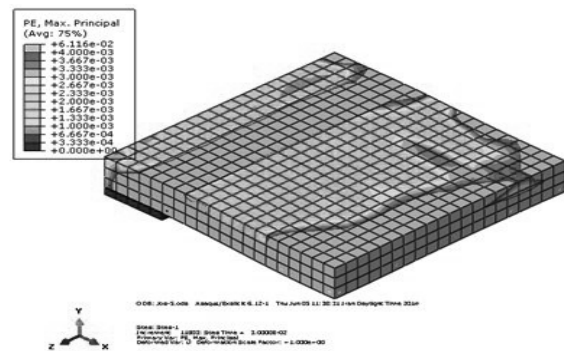
#### ۴-۲- سناریوهای انفجار در بالای عرشه و بین دو جان

برای انفجار اعمالی ۲۵۰ کیلوگرم بالای عرشه، واقع در بین جان ها، مدل بعد از اعمال انفجار، در شکل (۸) نشان داده شده است. برای مشخص کردن نواحی ترک های مهم، پارامتر حداکثر

حد، معادل با ده برابر کرنش ترک خوردگی کششی می باشد و بنابراین، بیانگر ترک های بزرگ و خیلی آشکار است. برای تعیین مقدار آسیب دیده بتن، حداقل کرنش پلاستیک اصلی بررسی شده است. حد کرنش  $-0.004$  (مصالح با رنگ سیاه) شامل خرد شدگی بتن در نظر گرفته شده است. همان طور که دیده می شود این ترک ها با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۲) سازگار هستند.



(الف)



(ب)

شکل ۵- ترک های سنگین، (ب) بتن خرد شده (منهدم شده)

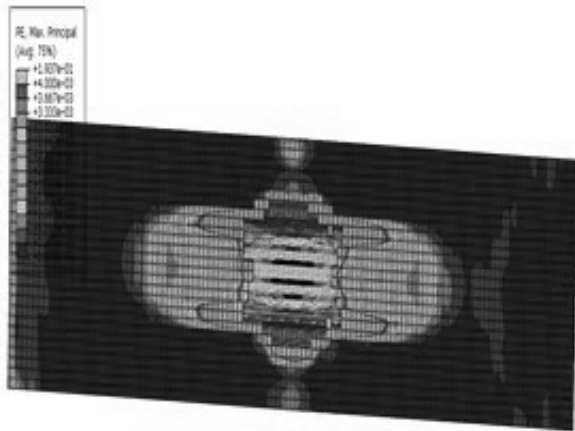
#### ۴- بررسی اجزای محدود رفتار سازه ای پل

##### پیش تنیده تحت بار انفجاری

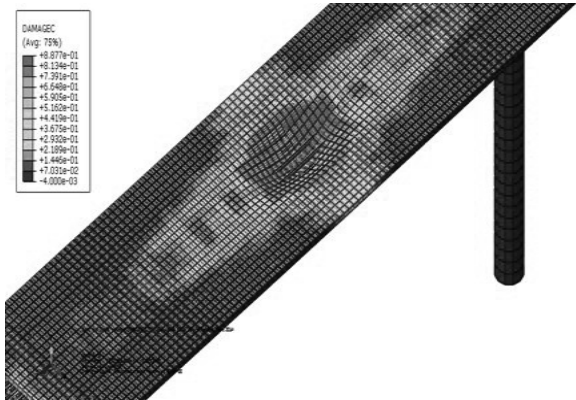
برای فهمیدن رفتار کلی پل های پیش ساخته پیش تنیده تحت بارهای انفجاری، مدل عددی با استفاده از نرم افزار ABAQUS آنالیز شده است. یک نمای کلی از پل- قبل از اینکه تحت سناریوهای انفجار قرار گیرد- در شکل (۶) نشان داده شده است. برای اعمال پیش تنیدگی، از اعمال گرادیان حرارتی منفی برای مدل کردن پیش تنیدگی، در کابل های پیش تنیده استفاده شده است. در تمام این مدل ها، زمان تحلیل ۵ میلی ثانیه با یک گام تعیین شده ۵۰ نانوثانیه (میلیاردم ثانیه) می باشد. گام زمانی کوچک برای عکس گرفتن از کل رفتار پل در زمان انفجار ضروری است. ۵ میلی ثانیه

کرنش پلاستیک اصلی بررسی شده است. کرنش‌ها که از ۰/۰۰۴ بیشتر هستند شامل ترک‌های سنگین است. این حد معادل با ده برابر کرنش ترک خوردگی کششی است و بنابراین، بیانگر ترک‌های بزرگ و خیلی آشکار هستند. برای تعیین کردن وسعت آسیب دیده بتن، حداقل کرنش پلاستیک اصلی بررسی شده است. حد کرنش شامل خردشدگی بتن در نظر گرفته شده است.

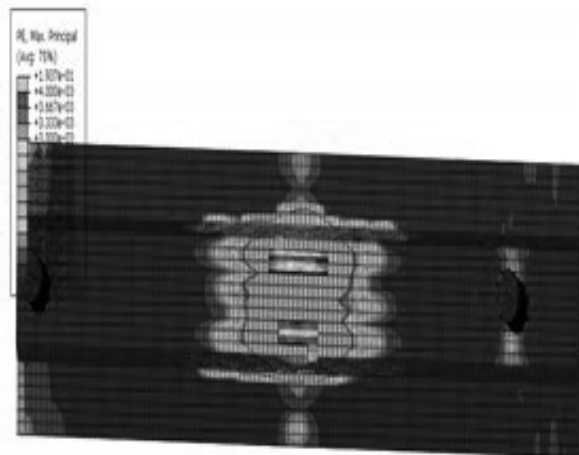
شکل (۸) نشان‌دهنده مدل در پایان اعمال موج فشار (۵۰ میلی ثانیه) است. تمام مصالحی که با رنگ خاکستری نشان داده شده‌اند بیانگر ترک‌های سنگین بتن می‌باشد (کرنش پلاستیک اصلی حداکثر، بزرگتر از ۰/۰۰۴ است). المان‌های حذف شده مربوط به بتن خوردشده (بتنی که ۸۰ درصد آن تخریب شده است) می‌باشد.



(الف)



شکل ۸- مدل تحت بار انفجاری ۲۵۰ کیلوگرم روی عرشه در بین دو جان



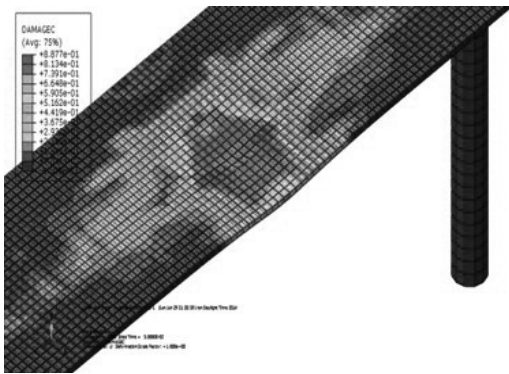
(ب)



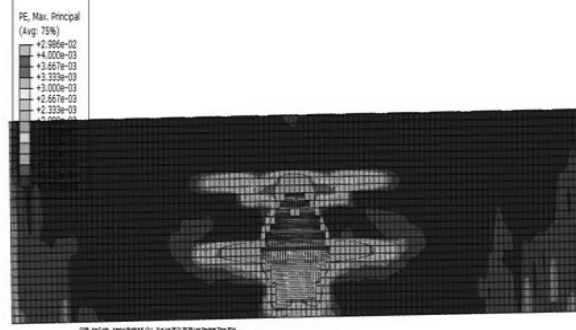
(ج)

شکل ۹- حداکثر کرنش پلاستیک مدل تحت بار انفجاری ۲۵۰ کیلوگرم در بین دو جان (الف) نمای بالا، (ب) نمای زیر و (ج) نمای کناری عرشه

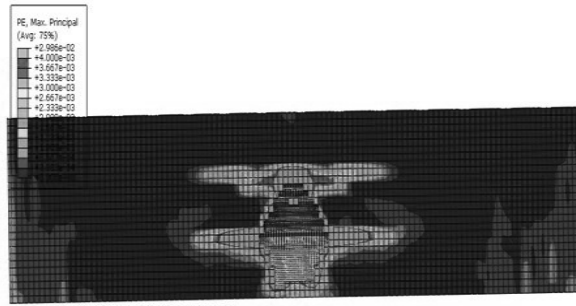
همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود انفجار، یک سوراخ پانچ به قطر حدوداً ۵/۵ متر در دال عرشه ایجاد می‌کند و بتن تخریب شده و از عرشه جدا شده است. ترک‌های سنگین حدوداً ۶/۵ متر در هر دو طرف جان و سطح پایینی عرشه مشاهده می‌شود. نزدیک محل انفجار، ترک‌های ۴۵ درجه بزرگ مشاهده شد. همچنین آنجا ترک‌های طولی در سطح پایینی عرشه جایی که با جان‌ها تقاطع دارد، ایجاد شد. این الگوی ترک‌ها با گسیختگی برشی در محل انفجار سازگار است. به واسطه فشار بالا و عملکرد سریع، موج فشار عرشه را پانچ می‌کند. ترک‌های طولی همچنین نشان‌دهنده خمش موضعی بال است. سطح عرشه در خارج از جان‌ها (بال‌های عرشه) آسیب قابل ملاحظه‌ای ندیده است. این نتایج اشاره دارد به اینکه در این سطح انفجار، پل نباید تخریب شود. اگر پل به اندازه کافی عریض باشد، ناحیه با دال تخریب‌شده می‌تواند حتی مسدود شده و خطوط دیگر ترافیکی می‌تواند بلافاصله برای عبور وسایل نقلیه باز شود.



شکل ۱۱- مدل تحت بار انفجاری ۲۵۰ کیلوگرم بالای عرشه و بر روی جان



(الف)



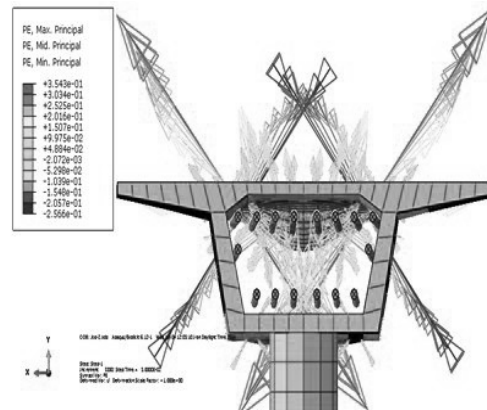
(ب)



(ج)

شکل ۱۲- حداکثر کرنش پلاستیک مدل تحت بار انفجاری ۲۵۰ کیلوگرم در روی جان (الف) نمای بالا، (ب) نمای زیر و (ج) نمای کناری عرشه

بررسی جهت کرنش پلاستیک اصلی نشان می‌دهد که شکست برشی حکم‌فرماست. در کمتر از یک میلی‌ثانیه نسبت به آنالیز، هنگامی که موج فشار هنوز دارد وارد می‌شود، گرایش قوی به پانچ عرشه دیده می‌شود. این امر در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



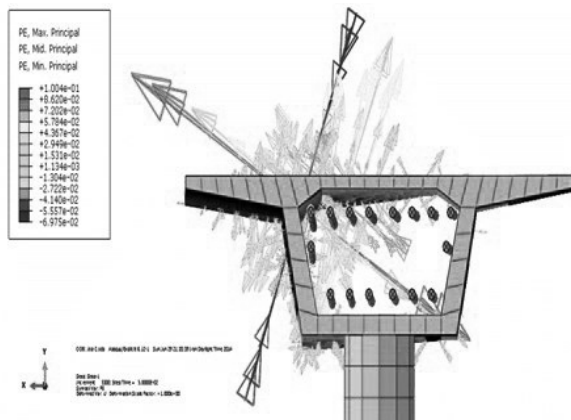
شکل ۱۰- جهت ترک‌های ایجادشده در مدل ناشی از فشار انفجار

برای انفجار اعمالی ۵۰۰ کیلوگرم بالای عرشه، واقع در بین جان‌ها، بررسی مدل بعد از اعمال انفجار نشان می‌دهد که انفجار، یک سوراخ پانچ به قطر حدوداً ۶/۷۵ متر در دال عرشه ایجاد می‌کند و بتن تخریب شده و از عرشه جدا شده است. حدوداً ۱۳/۵ متر از جان و سطح پایینی عرشه تخریب شده است. تنها ۳ متر از سطح عرشه در خارج از جان‌ها (بال‌های عرشه) آسیب قابل ملاحظه‌ای ندیده و سطح پایین عرشه نیز تقریباً تخریب شده است.

برای انفجار اعمالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بالای عرشه، واقع در بین جان‌ها، نتایج نشان می‌دهد که انفجار در این سطح، کل عرض عرشه به طول حدوداً ۸ متر را تخریب کرده است. ترک‌های سنگین به طول حدوداً ۲۵ متر در روی عرشه مشاهده می‌شود. سطح عرشه و جان‌ها تقریباً به قطر ۱۳ متر تخریب شده است. سطح پایین عرشه نیز به طول حدوداً ۸ متر تخریب شده است. این نتایج اشاره دارد به اینکه در این سطح انفجار، پل به کلی تخریب شده است.

#### ۳-۴- سناریوهای انفجار در بالای عرشه و روی جان

برای انفجار اعمالی ۲۵۰ کیلوگرم بالای عرشه، واقع بر روی جان، مدل بعد از اعمال انفجار در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۲) مدل نشان می‌دهد، انفجار، یک سوراخ پانچ به قطر حدوداً ۴/۵ متر در دال عرشه ایجاد می‌کند و بتن تخریب شده و از عرشه جدا شده است. حدوداً ۸ متر از جانی که زیر انفجار قرار داشته تخریب شده و جان دیگر، بدون آسیب باقی



شکل ۱۳- جهت ترک‌های ایجادشده در مدل ناشی از فشار انفجار بر روی جان

۱۰/۴ متر از جانی که زیر انفجار قرار داشته تخریب شده و جان دیگر، تقریباً بدون آسیب باقی مانده است. در سطح پایینی عرشه به طول ۴/۸ و عرض ۱/۲ متر بتن تخریب شده و ترک‌های سنگین به طول ۱۰/۵ متر برای سطح پایینی عرشه مشاهده می‌شود. در این سطح از انفجار، ۳/۲ متر از سطح عرشه بدون آسیب باقی مانده است. جانی که دور از انفجار بوده است نیز بدون تخریب قابل ملاحظه و یا کاهشی در مقاومت آن، باقی مانده است.

انفجار اعمالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بالای عرشه واقع بر روی جان، تخریبی به صورت دایره‌ای به قطر حدوداً ۱۵ متر در دال عرشه ایجاد می‌کند و بتن تخریب شده و از عرشه جدا شده است. حدوداً ۱۵ متر از جانی که زیر انفجار قرار داشته تخریب شده و در جان دیگر، ترک‌های سنگین مشاهده شده است. در سطح پایینی عرشه به طول ۴/۸ و عرض ۱/۲ متر بتن تخریب شده و ترک‌های سنگین به طول ۱۵ متر برای سطح پایینی عرشه مشاهده می‌شود. در این سطح از انفجار، ۲/۴ متر از سطح عرشه بدون آسیب باقی مانده است. جانی که دور از انفجار بوده است متحمل ترک‌های سنگین و نیز کاهش در مقاومت آن شده است.

#### ۴-۴- مقایسه ظرفیت اتلاف انرژی تحت سناریوهای مختلف

در این قسمت برای بررسی اثر مقدار و همچنین موقعیت مواد منفجره در روی عرشه، میزان ظرفیت اتلاف انرژی مقایسه گردیده است.

مانده است. در سطح پایینی عرشه، بتن تخریب نشده و ترک‌های سنگین به طول ۸ متر برای سطح پایینی عرشه مشاهده می‌شود. بنابراین، برای انفجار بالای عرشه، روی جان مشاهده می‌شود که مقدار خیلی کمی از بتن تخریب شده است، اگرچه در اینجا ترک‌های قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. می‌توان مشاهده کرد که جان بلافاصله تحت انفجار برای سخت‌تر کردن دال که گسیختگی پانچ اتفاق نیفتد کافی باشد. علاوه بر این، دال، حفاظت کافی برای جان برای جلوگیری از خرابی کلی فراهم می‌کند.

گستره ترک‌خوردگی برای این سناریوی بارگذاری شبیه به حالت بالای عرشه و بین دو جان است. همچنین مشاهده شد که وسعت طولی ترک‌ها حدود ۱۰ متر است. در جهت عرضی، وسعت ترک‌های سنگین به نزدیکی جان حدوداً ۶/۸ متر می‌شود. جان بلافاصله تحت بار انفجار، ترک‌های سنگین در کل عمق آن را نشان می‌دهد. در جان دیگر، ترک قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌گردد. وسعت تخریب شبیه به وسعت ترک‌خوردگی است. مشاهده گردید که پل تحت فشار انفجار، که از جان تخریب شده است، بیان‌کننده کاهش ظرفیت است.

برای دو سناریوی انفجاری بالای عرشه، دیده می‌شود که برای سطح زیر منبع انفجار، وجود یک جان برای سخت‌تر کردن دال و توقف گسترش ترک‌های سنگین، موثر است. همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای یک عرض کافی پل، برخی مسیرها ممکن است دوباره بلافاصله بعد از حادثه باز شوند. حتی اگر تنها یک مسیر برای وسایل نقلیه اضطراری باز باشد به پل این امکان را می‌دهد که بدون وقفه در سرویس دهی باشد. اجازه دادن به وسایل نقلیه اضطراری برای رسیدن به مقصد در سریع‌ترین راه ممکن، در حملات تروریستی ضروری است.

بررسی جهت ترک‌ها در انتهای آنالیز نشان می‌دهد که یک تفاوت ناچیزی بین الگوهای شکست وجود دارد. به جای دیدن یک سطح تخریب مخروطی شکل که بار انفجار از طریق پانچ عرشه را سوراخ می‌کند، مشاهده می‌شود که اینجا یک سطح تخریب مخروطی شکل در دو طرف جان است. این تمایل، در شکل (۱۳) شرح داده شده است. این، تنها برای تاکید بیشتر بر این، موضوع است که جان، سخت‌شوندگی بیشتری ارائه می‌دهد و از دال محافظت می‌کند. انفجار اعمالی ۵۰۰ کیلوگرم بالای عرشه واقع بر روی جان، انفجار، تخریبی به قطر حدوداً ۶/۴ متر در دال عرشه ایجاد می‌کند و بتن تخریب شده و از عرشه جدا شده است. حدوداً



مختلف مواد منفجره در موقعیت های مختلف بر روی عرشه مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۱۴) دیده می شود برای مدل های تحت بارهای انفجاری ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم ظرفیت اتلاف انرژی برای انفجار در روی جان، به ترتیب ۱۴۸٪، ۲۲۵٪ و ۵۸۹٪ نسبت به انفجار در بین جان ها افزایش یافته است. مقایسه نمودارها، بیانگر نقش جان عمودی در افزایش ظرفیت اتلاف انرژی و کاهش خسارت وارده به پل تحت بار انفجاری می باشد. همانطور که در نمودارهای آبی رنگ مشاهده می شود، این افزایش ظرفیت اتلاف انرژی، مربوط به مقادیر کم مواد منفجره بوده و در مقادیر خیلی زیاد، این نمودارها تقریباً به هم نزدیک شده اند.

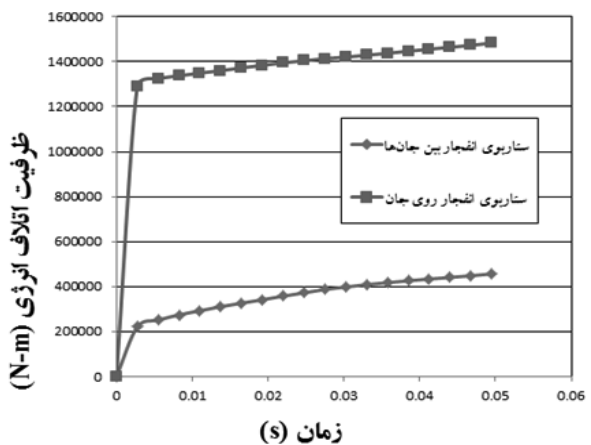
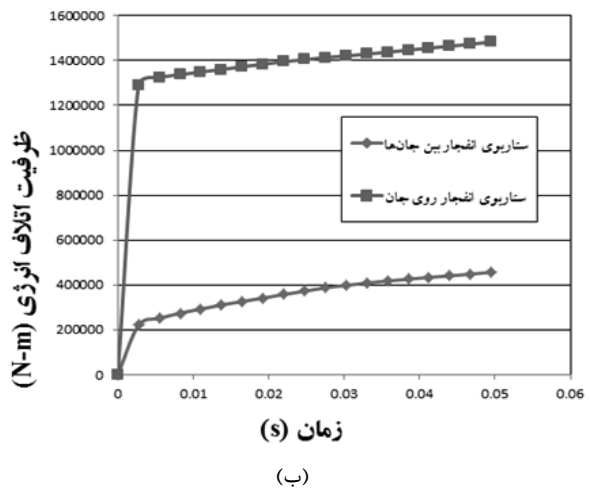
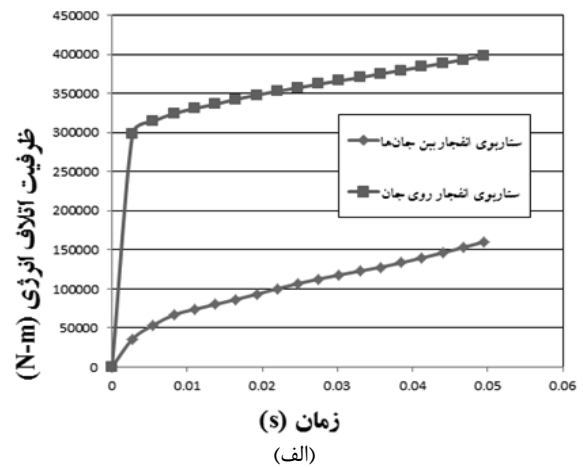
### ۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، برای ارزیابی پاسخ کلی یک پل بزرگراهی تحت بارگذاری انفجاری، یک شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده است. برای صحت سنجی مدل ساخته شده در نرم افزار، یک تست آزمایشگاهی متعلق به سایر محققین برای بارگذاری انفجار بر روی بتن پیش تنیده در نرم افزار مدل شد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل ساخته شده در نرم افزار، همگرایی قابل قبولی به دست آمد. بنابراین، مورد اعتماد بودن نتایج تایید گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی های عددی، معیارهایی برای حفاظت آنها پیشنهاد می شود.

هنگامی که مدل پل تحت سناریوی انفجار در بالای عرشه قرار می گیرد، مشاهده می شود که گسیختگی می تواند ناشی از خردشدگی عرشه و در ادامه، ترک های خمشی گردد. این موضوع بیشتر ناشی از نیروهای فشاری تولید شده توسط انفجار است.

برای بار وارده بالای عرشه، بین دو جان، فشار انفجار در دال یک سوراخ ایجاد کرد، اما اطراف جان ها نسبتاً تغییر نکرد. این سناریو بیان می کند که پل ممکن است ریزش نکرده و حتی ممکن است بلافاصله بعد از انفجار، خطوط برای عبور وسایل نقلیه باز گردد. اما برای انفجار وارده در روی جان، امواج انفجار بلافاصله باعث آسیب به جان در زیر منبع انفجار و همچنین اطراف عرشه می شود که انتظار می رود پل بلافاصله قابل سرویس دهی باشد.

برای سناریوی انفجاری بالای عرشه، دیده شد برای سطح زیر منبع انفجار، وجود یک جان برای سخت تر کردن دال و توقف گسترش ترک های سنگین، موثر است. همچنین می توان نتیجه گیری کرد که برای یک عرض کافی پل، برخی مسیرها



در شکل (۱۴) نمودار ظرفیت (ج) اتلاف انرژی برای مقادیر

شکل ۱۴- ظرفیت اتلاف انرژی (الف) مدل تحت بار انفجاری ۲۵۰ کیلوگرم (ب) مدل تحت بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم (ج) مدل تحت بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم

5. J. Magnusson and M. Hallgren, "Reinforced High Strength Concrete Beams Subjected to Air Blast Loading," Structures Under Shock and Impact VIII, edited by N. Jones and C. A. Brebbia, Computational Mechanics Inc., Billerica, Ma., pp. 53-62, 2004.
6. J. Li and H. Hao, "Influence of brittle shear damage on accuracy of the two-step method in prediction of structural response to blast loads," Int. J. Impact Eng., 54:217e31, 2013.
7. J. Li and H. Hao, "Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique," Eng. Struct., 52:101e13, 2013.
8. K. Bi and H. Hao, "Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions," Eng. Struct., 46:62e76, 2013.
9. C. F. Zhao and J. Y. Chen, "Damage mechanism and mode of square reinforced concrete slab subjected to blast loading," Theor. Appl. Fract. Mech., 63e 64:54e62, 2013.
10. J. Baylot, J. Roy, and J. Hall, "Prediction Method for Response of Steel Bridge Beams and Girders to Blast and Fragment Load," Transportation Research Record, 2002.
11. ABAQUS, "User's Manual," Version 6.12, 2013.
12. ABAQUS, "Theory Manual," 2013.
13. J. Lubliner, J. Oliver and E. Onate, "A Plastic Damage Model for Concrete," Internat. J. Solids Structures, vol. 25, pp. 299-329, 1989.
14. M. B. Lu, "Application of Displacement-Based Design Method to Blast-Resistant Reinforced Concrete Structures," Ph. D. Thesis, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 2005.

ممکن است دوباره بلافاصله بعد از حادثه باز شوند. حتی اگر تنها یک مسیر برای وسایل نقلیه اضطراری باز باشد به پل این امکان را می‌دهد که بدون وقفه در سرویس‌دهی باشد. اجازه دادن به وسایل نقلیه اضطراری برای رسیدن به مقصد در سریع‌ترین راه ممکن در حملات تروریستی یک مسئله خیلی ضروری است.

اجزای بتنی صرف‌نظر از مقاومت فشاری بتن خیلی سریع شکسته می‌شوند در حالی که میلگرد تقویتی گسیخته نمی‌شود و جابجایی زیادی را می‌تواند تحمل کند. اجزای سازه‌ای باید در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ و حد شکل‌پذیری بالا طراحی شوند.

شتاب در نزدیک‌ترین نقطه یا المان به مرکز انفجار، یک پارامتر مهم در طراحی پل‌ها تحت انفجارهای نزدیک است. مقدار شتاب، سریع‌ترین مقدار است که در مقایسه با سرعت و جابجایی تنزل می‌یابد. مقدار شتاب حداکثر در زمان  $0.02/0$  ثانیه به بیشترین میزان خود می‌رسد (قبل از سرعت حداکثر، که در زمان  $0.06/0$  ثانیه اتفاق می‌افتد).

سیستم کابلی می‌تواند برای یک مسیر بارگذاری متغیر به‌منظور حفظ سازه تحت بار انفجاری شدید، طراحی شود. عملکرد یکپارچه در سیستم کابل پیش‌تنیده اگر بتواند در سرتاسر پل توسعه یابد می‌تواند آسیب‌های موضعی که ممکن است در عرشه پل اتفاق بیفتد، را کاهش دهد. این سیستم همچنین از تخریب پیشرونده و گسترش تخریب به دهانه‌های مجاور جلوگیری می‌کند.

## ۶- مراجع

1. T. Rabczuk and J. Eibl, "Modelling dynamic failure of concrete with meshfree methods," Int. J. Impact Eng., 32:1878e97, 2006.
2. K. Xu and Y. Lu, "Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading," Comput. Struct., 84:431e8, 2006.
3. E. B. Williamson and D. G. Winget, "Risk Management and Design of Critical Bridges for Terrorist Attacks," Journal of Bridge Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 96-106, 2005.
4. D. G. Winget, K. A. Marchand, and E. B. Williamson, "Analysis and Design of Critical Bridges Subjected to Blast Loads," Journal of Structural Engineering, vol. 131, no. 8, pp. 1243-1255, 2005.

---

# Behaviour of Prestressed Concrete Bridge Under Blast Loading

E. Mahdavi Sefat\*, M. Vatani

## Abstract

Increasing terrorist attacks to substructure and transport structures is an alarm for national security. In the past designing structures against the explosive loads were only limited to military buildings and buildings related to atomic activities. Bridges are important elements in transport systems. The vital rule of bridges and national importance of them makes the bridges a good target as a terrorist attack. Better design of these structures under explosive load to prevent growing collapse is of great importance. Prestressed concrete bridges are very popular however; there is lack of information and study about these bridges under the explosive load.

In this research a finite element model for concrete bridges with prestressed elements has been established by ABAQUS software. A validation has been carried out by laboratory test of other researchers and acceptable convergence was observed.

Established models were placed on the width of bridge deck under different explosive scenarios by different weight of explosive materials. Collapse process of bridge has been observed and the destruction mechanism has also been investigated. Results of this study give us some information about behavior and possible response of pre prepared bridges under the severe explosive load which can help the engineers to select the most effective way of operation improvement and retrofitting of these bridges.

**Key Words:** *Prestressed Concrete Bridges, Explosive Loads Progressive Failure, Numerical Method*